

Vol. 6, No. 2, Juli - Desember 2017

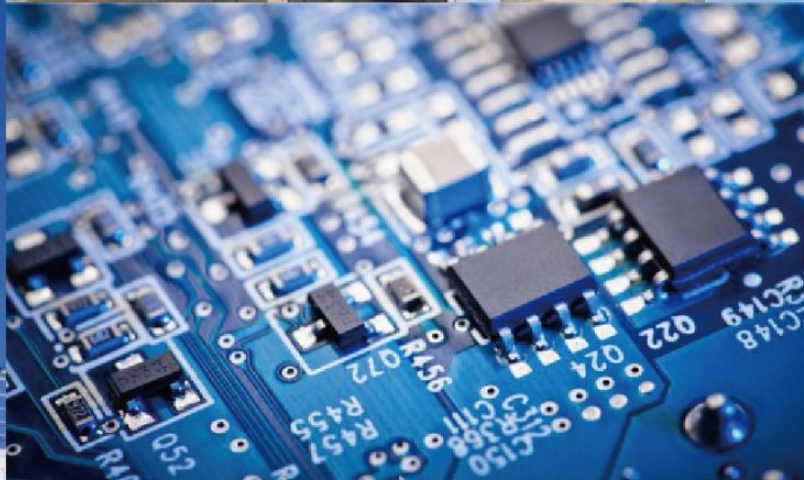
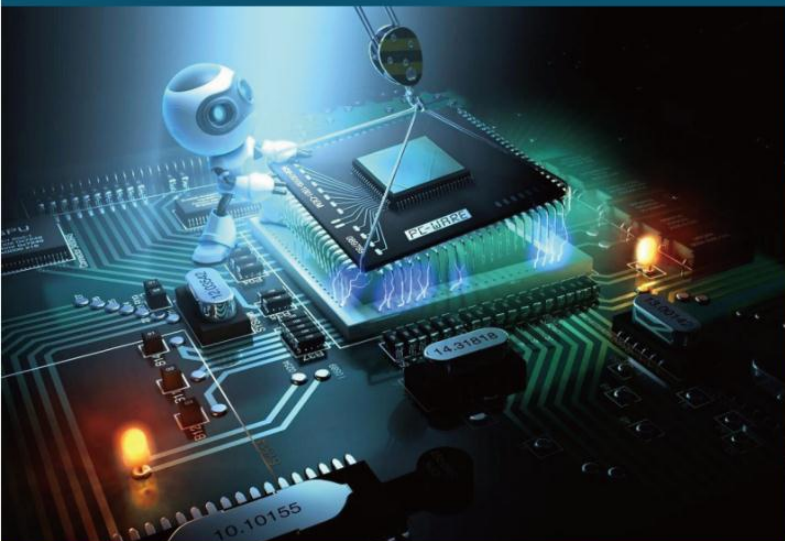
P-ISSN: 2302-8734

E-ISSN: 2581-0006



JURNAL TEKNIK

Alamat Redaksi: Jl. Perintis Kemerdekaan I No. 33, Cikokol Tangerang - Tlp. (021) 51374916



JURNAL TEKNIK



UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH TANGERANG

Pelindung:

Dr. H. Achmad Badawi, S.Pd., SE., MM.
(Rektor Universitas Muhammadiyah Tangerang)

Penanggung Jawab:

Ir. Saiful Haq, ST., M.Si.
(Dekan Fakultas Teknik)

Pembina Redaksi:

Rohmat Taufik, ST., M.Kom.
Drs. H. Syamsul Bahri, MSi.

Pimpinan Redaksi:

Ir. Sumardi Sadi, S.Pd., ST., MT.

Redaktur Pelaksana:

Yafid Efendi, ST, MT.

Editor Jurnal Teknik UMT:

Ir. Sumardi Sadi, S.Pd., ST., MT.

Dewan Redaksi:

Ir. Ali Rosyidin, ST., MM., MT.
Tri Widodo, ST., MT.
Tina Herawati, ST., MT.
Almufid, ST., MT.
Siti Abadiyah, ST., MT.
M. Jonni, SKom., MKom.
Syepri Maulana Husain, S.Kom., M.Kom.
Ir. H. Bayu Purnomo, ST., MT.

Kasubag:

Ferry Hermawan, MM.

Kuangan:

Elya Kumalasari, S.Ikom.

Setting & Lay Out:

Muhlis, S.E.
Saiful Alam, SE..

Mitra Bestari:

Prof. Dr. Aris Gumilar (UMT)
Prof. Dr. Ing. Mudrik Alaydrus (Univ. Mercu Buana)
Dr. Alimuddin, ST., MM., MT. (UNTIRTA)
Dr. Ir. Budiyanto, MT. (UMJ)
Dr. Ing. Agus Sofwan, M.Eng.Sc. IPM (ISTN Jakarta)

JURNAL TEKNIK

Diterbitkan Oleh:

Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Tangerang

Alamat Redaksi:

Jl. Perintis Kemerdekaan I No. 33, Cikokol Tangerang
Tlp. (021) 51374916

Jurnal Teknik	Vol.	No.	Hlm.	UMT	ISSN
	6	2	1-112	Juli-Des' 2017	P-ISSN: 2302-8734 E-ISSN: 2581-0006

DAFTAR ISI

- PERANCANGAN SISTEM PENDUKUNG KEPUTUSAN PENERIMAAN BEASISWA MENGGUNAKAN METODE SAW PADA SMP YUPPENTEK 1 LEGOK**
Rohmat Taufiq & Maulana Reza Fahlevi ~ Hlm. 1-9
- ANALISIS TINGKAT KEPUASAN KONSUMEN PERUMAHAN REAL ESTATE DI KOTA BENGKULU**
Ria Rossaty ~ Hlm. 10-24
- ANALISIS RISIKO PELAKSANAAN PROYEK PEMBANGUNAN UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH TANGERANG TAHUN 2014 TERHADAP KINERJA BIAYA, MUTU DAN WAKTU**
Sugeng Purwanto ~ Hlm. 25-33
- PENGARUH DIAFRAGMA TERHADAP PERILAKU SISTEM STRUKTUR JEMBATAN**
Jeply Murdianan Guci ~ Hlm. 34-48
- PENENTUAN PERSEDIAAN OPTIMAL DENGAN METODE PROBABILISTIK PADA PT. LESTARI DINI TUNGGUL**
Yevita Nursyanti & Firman Aulani ~ Hlm. 49-53
- RANCANG BANGUN PENDEKTESIAN ASAM DAN BASA BERBASIS ARDUINO UNO**
Triono Suryo Atmojo, Eddo Mahardika, & Marwan Rosyadi ~ Hlm. 54-61
- SISTEM PENDUKUNG KEPUTUSAN PROMOSI JABATAN STRUKTURAL DOSEN MENGGUNAKAN AHP (ANALYTICAL HIERARCHY PROCESS)**
Rahma Farah Ningrum, Dian Hartanti, & Karina Djunaidi ~ Hlm. 62-71
- ENTERPRISE ARCHITECTURE PLANNING UNTUK PENGEMBANGAN SISTEM INFORMASI AKADEMIK MENGGUNAKAN ZACHMAN FRAMEWORK**
Desi Nurnaningsih ~ Hlm. 72-82
- INTEGRASI MODEL PENDUKUNG KEPUTUSAN EVALUASI PEMILIHAN VENDOR DENGAN FUZZY ANALYTICAL NETWORK PROCESS DAN TOPSIS STUDI KASUS PT SAMUDERA INDONESIA SHIP MANAGEMENT**
Frahdian Pohan & Arief Wibowo ~ Hlm. 83-91
- ANALISA DESIGN SI/TI PENGELOLA SURAT BERBASIS WEB PADA KANTOR KECAMATAN PAKUHAJI DI KABUPATEN TANGERANG**
Hendra Mayatopani & Siti Nurfadilah ~ 82-98
- SISTEM KEAMANAN BUKA TUTUP KUNCI BRANKAS MENGGUNAKAN BLUETOOTH HC – 05 BERBASIS ARDUINO MEGA 2560**
Sumardi Sadi & Muhamad Yoga Mulya Pratama ~ Hlm. 99-105
- RANCANG BANGUN SISTEM INFORMASI PENJUALAN PADA PT GRATIA JELAJAH SEMESTA BERBASIS WEB**
Sri Mulyati & Angga Setiawan ~ Hlm. 106 -112



**Sambutan Dekan
Fakultas Teknik**
Universitas Muhammadiyah Tangerang

Puji Syukur kehadiran Allah Swt. karena berkat karunia dan ijin-Nyalah Tim penyusun Jurnal Teknik Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Tangerang dapat menyelesaikan tugasnya tepat sesuai dengan waktu ditetapkan.

Saya menyambut baik diterbitkannya Jurnal Teknik Vol. 6 No. 2, Juli-Desember 2017, terbitnya jurnal ini, merupakan respon atas terbitnya Peraturan Menteri Pendidikan Nasional No. 17 Tahun 2010 tentang Pencegahan dan Penanggulangan Plagiat di Perguruan Tinggi; Surat Dirjen Dikti Nomor 2050/E/T/2011 tentang kebijakan unggah karya ilmiah dan jurnal; Surat Edaran Dirjen Dikti Nomor 152/E/T/2012 tertanggal 27 Januari 2012 perihal publikasi karya ilmiah yang antara lain menyebutkan untuk lulusan program sarjana terhitung mulai kelulusan setelah 2012 harus menghasilkan makalah yang terbit pada jurnal ilmiah.

Terbitnya Jurnal ini juga diharapkan dapat mendukung komitmen dalam menunjang peningkatan kemampuan para dosen dan mahasiswa dalam menyusun karya ilmiah yang dilandasi oleh kejujuran dan etika akademik. Perhatian sangat tinggi yang telah diberikan rektor Universitas Muhammadiyah Tangerang khususnya mengenai *plagiarism* dan cara menghindarinya, diharapkan mampu memacu semangat dan motivasi para pengelola jurnal, para dosen dan mahasiswa dalam menyusun karya ilmiah yang semakin berkualitas.

Saya mengucapkan banyak terimakasih kepada para penulis, para pembahas yang memungkinkan jurnal ini dapat diterbitkan, dengan harapan dapat dimanfaatkan seoptimal mungkin dalam peningkatan kualitas karya ilmiah.

Dekan Fakultas Teknik

Dekan Fakultas Teknik
Universitas Muhammadiyah Tangerang,

Ir. Saiful Haq, M.Si.



Pengantar Redaksi
Jurnal Teknik
Universitas Muhammadiyah Tangerang

Puji dan Syukur Alhamdulillah kami panjatkan kehadapan Allah Swt. atas karunia dan lindungan-Nya sehingga Jurnal Teknik Vol. 6 No. 2 edisi Juli-Desember 2017 dapat diterbitkan.

Menghasilkan karya ilmiah merupakan sebuah tuntutan perguruan tinggi di seluruh dunia. Tri Dharma Perguruan Tinggi yaitu darma pendidikan, darma penelitian, dan darma pengabdian kepada masyarakat mendorong lahirnya dinamika intelektual diantaranya menghasilkan karya-karya ilmiah. Penerbitan Jurnal Teknik ini dimaksudkan sebagai media dokumentasi dan informasi ilmiah yang sekiranya dapat membantu para dosen, staf dan mahasiswa dalam menginformasikan atau mempublikasikan hasil penelitian, opini, tulisan dan kajian ilmiah lainnya kepada berbagai komunitas ilmiah.

Buku Jurnal yang sedang Anda pegang ini menerbitkan 12 artikel yang mencakup bidang teknik sebagaimana yang tertulis dalam daftar isi dan terdokumentasi nama dan judul-judul artikel dengan jumlah halaman 1-112 halaman.

Jurnal Teknik ini tentu masih banyak kekurangan dan masih jauh dari harapan, namun demikian tim redaksi berusaha untuk ke depannya menjadi lebih baik dengan dukungan kontribusi dari semua pihak. Harapan Jurnal Teknik akan berkembang menjadi media komunikasi intelektual yang berkualitas, aktual dan faktual sesuai dengan dinamika di lingkungan Universitas Muhammadiyah Tangerang.

Tak lupa pada kesempatan ini kami mengundang pembaca untuk mengirimkan naskah ringkasan penelitiannya ke redaksi kami. Kami sangat berterimakasih kepada semua pihak yang telah membantu penerbitan Jurnal Teknik ini semoga buku yang sedang Anda baca ini dapat bermanfaat.

Pimpinan Redaksi Jurnal Teknik
Universitas Muhammadiyah Tangerang,

Ir. Sumardi Sadi, S.Pd., ST., MT.

PENGARUH DIAFRAGMA TERHADAP PERILAKU SISTEM STRUKTUR JEMBATAN

Jeply Murdianan Guci
Program Studi Teknik Sipil
Fakultas Teknik - Universitas Muhamadiyah Tangerang
Jl. Perintis Kemerdekaan I /33, Cikokol Kota Tangerang
Email: *jeplymg@ymail.com*

ABSTRAK

Pengaruh diafragma terhadap perilaku sistem struktur jembatan beton bertulang bertipe grid yang terbuat dari komponen balok gelagar dan pelat lantai. Untuk mendapatkan pengaruh diafragma terhadap perilaku struktur, dilakukan tiga macam analisis dan dua tahap pembebanan, yaitu struktur tanpa diafragma pada tahap beban mati dan tahap beban hidup, struktur tanpa diafragma pada tahap beban mati dan dengan diafragma pada tahap beban hidup, serta struktur dengan diafragma pada tahap beban mati dan tahap beban hidup. Analisis dilakukan dengan menggunakan metoda elemen hingga dalam formulasi matriks. Gelagar dimodelkan dengan elemen lentur-torsi dengan gaya prategang. Diafragma dimodelkan dengan elemen lentur-torsi tanpa gaya prategang. Pelat lentur dimodelkan dengan elemen pelat lentur menurut teori *Kirchhoff*. Analisis dituangkan dalam satu program paket komputer yang dituliskan dalam bahasa Fortran. Program yang khusus disusun untuk keperluan penelitian telah diuji kebenarannya dengan melakukan proses validasi, berupa perbandingan hasil yang diperoleh lewat penerapan program dengan solusi eksak. Terbukti bahwa program memberikan hasil yang cukup dekat dengan solusi eksak. Program diterapkan terhadap analisis jembatan berbentang 40 meter dengan lebar 18 meter. Jembatan dimodelkan dengan 16 gelagar, 16 diafragma dan 16 pelat lentur. Studi kasus terdiri atas perbandingan perilaku jembatan pada kasus tanpa diafragma dengan kasus dengan diafragma. Penggunaan diafragma ternyata sangat meredusir perpindahan dan momen baik pada gelagar maupun pada pelat.

Kata Kunci: *Diafragma, Torsi, Lentur, Grid.*

1. PENDAHULUAN

Dalam era modern ini, pengembangan infrastruktur menjadi program utama untuk mendukung pertumbuhan ekonomi suatu negara. Pertumbuhan ekonomi akan tercapai jika diiringi dengan kualitas infrastruktur yang baik. Infrastruktur juga memegang peranan penting sebagai salah satu roda penggerak pertumbuhan ekonomi, terutama untuk memenuhi kebutuhan manusia yang semakin meningkat. Jembatan merupakan alat pelengkap transportasi untuk menunjang perkembangan infrastruktur. Infrastruktur jembatan terus berkembang sampai sekarang. Jem-

batan secara umum berfungsi untuk menghubungkan dua tempat yang terpisahkan oleh separator seperti sungai atau lembah sehingga perjalanan darat dapat dilakukannya antara kedua tempat tersebut. Indonesia sebagai negara yang terdapat banyak sungai akan membutuhkan infrastruktur jembatan untuk menghubungkan kedua daerah.

Untuk mendapatkan suatu desain yang aman dan andal, perencanaan suatu jembatan harus memenuhi berbagai macam standard yang berlaku. Dengan demikian, didapatkan suatu konfigurasi jembatan yang memenuhi standard yang berlaku, khususnya dalam as-

pek kekuatan (*strength*) dan aspek kelayanan (*serviceability*). Menurut urutan, suatu desain harus memenuhi kriteria kekuatan, baru setelah itu dicek terhadap kriteria kelayanan dan ekonomi. Sering ditemukan kasus di mana desain sudah memenuhi kriteria kekuatan namun tidak memenuhi kriteria kelayanan.

Hal tersebut di atas pernah terjadi dalam kasus jembatan suatu ruas jalan di tanah air. Kasus yang dihadapi adalah bahwa jembatan didesain terdiri atas balok-balok prategang yang mendukung pelat lantai. Jembatan tersebut tidak diberi diafragma untuk menggandeng balok-balok secara bersama dalam memikul beban luar. Absennya diafragma menimbulkan perpindahan yang sangat berbeda antara balok yang bersebelahan akibat beban luar yang tidak seragam. Akibatnya, terjadi keretakan pada pelat-pelat lantai. Ini menunjukkan bahwa pemasangan diafragma sangat mempengaruhi perilaku sistem struktur jembatan terhadap gaya luar. Pengaruh dari pada pemasangan diafragma terhadap perilaku sistem struktur jembatan merupakan lingkup yang sentral dalam penelitian ini.

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah untuk menentukan pengaruh dari pada pemasangan diafragma terhadap perilaku struktur jembatan terhadap beban luar. Karena tidak tersedia metoda eksak yang dapat digunakan untuk keperluan penelitian ini, maka dalam proses penelitian dilakukan dengan analisis yang menggunakan metoda numerik, dalam hal ini metoda elemen hingga. Analisis sistem struktur dengan metoda elemen hingga, dituangkan ke dalam satu program paket komputer yang khusus disusun untuk keperluan penelitian.

Untuk dapat mengkaji pengaruh dari pada kehadiran diafragma dalam sistem struktur jembatan, maka dilakukan proses sebagai berikut.

1. Analisis sistem struktur jembatan tanpa diafragma, dilanjutkan dengan analisis sistem struktur jembatan yang sama, namun dengan diafragma.
2. Membandingkan respons sistem struktur jembatan tanpa diafragma terhadap respons sistem struktur jembatan dengan diafragma. Hasil perbandingan digunakan untuk menentukan pengaruh penggunaan diafragma terhadap perilaku sistem struktur jembatan terhadap beban luar.

Bahasan mencakup analisis sistem struktur jembatan dalam batas tahap elastis linier, terhadap beban mati, gaya prategang dan beban hidup dengan 2 (dua) *load step* pembebanan. Sistem struktur jembatan diperlakukan sebagai sistem grid yang terdiri atas pelat lantai yang didukung oleh gelagar beton prategang, dan atau tanpa diafragma.

Pada penelitian ini digunakan konstruksi jembatan dengan 6 (enam) lajur dengan 2 (dua) jalur lalu lintas, dan setiap jalur terdiri atas 3 (tiga) lajur lalu lintas, di mana tipe jembatan yang ditinjau adalah jembatan jalan raya (*highway bridge*). Bentang jembatan adalah 40.0 meter dan lebar 18.0 meter, dan digunakan 5 gelagar dengan jarak 4.5 meter (pusat ke pusat).

Untuk melihat pengaruh yang diberikan elemen diafragma terhadap perilaku jembatan digunakan beberapa kombinasi model jembatan berdasarkan pemakaian elemen diafragma menjadi jembatan dengan diafragma dan jembatan tanpa diafragma, serta kombinasi berdasarkan penempatan beban luar pada jembatan.

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran seberapa besar pengaruh dan kontribusi dari diafragma terhadap struktur jembatan sehingga dapat diaplikasikan dan direkomendasikan pada tata cara desain jembatan.

2. METODA ELEMEN HINGGA

Metoda elemen hingga disusun berdasarkan hubungan dari gaya dan perpindahan akibat beban yang bekerja pada struktur. Metoda elemen hingga disusun berdasarkan teori elastisitas yang merupakan dasar dari mekanisme gaya maupun perpindahan yang disusun dengan menerapkan konsep perpindahan maya.

Pembahasan mengenai teori dasar elastisitas menjelaskan mengenai konsep dasar tegangan, hubungan perpindahan dan regangan, dan hubungan tegangan dan regangan. Prinsip kerja perpindahan maya dilakukan untuk mendefinisikan keseimbangan, karena prinsip perpindahan maya tidak bergantung apakah hubungan tegangan-regangan adalah linier atau tidak, dan juga berlaku untuk struktur yang tidak konservatif (sistem yang tidak mempunyai fungsi potensial). Setelah memperoleh kriteria keseimbangan dari prinsip perpindahan maya

maka formulasi elemen hingga dapat disusun.

a. Diskritisasi Sistem Struktur

Proses diskritisasi suatu sistem struktur merupakan langkah pertama dalam penerapan metoda numerik, dan mencakup pembagian keseluruhan sistem atas beberapa bagian dengan mengambil suatu jejaring elemen (*elementmeshing*), yang terdiri atas garis-garis atau bidang pembatas antar bagian, dan dilengkapi dengan titik-titik simpul (*nodes*) pada mana nantinya komponen-komponen perpindahan dan gaya reaksi disampel. Titik perletakan, titik balik (*re-entrant*) atau perobahangeometri batas yang mendadak (*abrupt changes*) dicakup dalam garis-garis atau bidang batas jejaring. Bagian struktur yang dibatasi jejaring dinamakan elemen (*element*).

Pada batas-batas antar sub-bagian dan/atau di bagian dalam elemen, diambil titik-titik simpul (*nodes*), pada mana dimisalkan komponen-komponen perpindahan dan gaya-gaya yang nantinya akan dihitung. Analisis melibatkan besaran-besaran komponen perpindahan dan gaya pada titik simpul dan tidak mengenal komponen perpindahan dan gaya pada titik-titik lain selain titik simpul. Dengan demikian, agar gaya yang bekerja tidak pada titik simpul dapat diperhitungkan secara benar dalam analisis, gaya-gaya semacam ini perlu dipindahkan kepada titik simpul dengan menerapkan cara ekuivalensi. Itu pulalah alasan kenapa perletakan, beban terpusat dan batas-batas gaya terdistribusi perlu ditepatkan jatuh pada simpul sisi atau simpul dalam elemen.

Pengambilan jejaring memang bersifat subjektif serta tergantung selera perekayasa, namun penerapannya perlu didasari atas pengalaman yang telah diperoleh sebelumnya. Jejaring elemen perlu diambil sesederhana mungkin, namun secara optimal dapat merepresentasikan struktur sebenarnya dengan baik dan dengan ketelitian yang cukup. Pengambilan jejaring elemen perlu diambil sedemikian hingga menghindari terjadinya sudut-sudut elemen yang terlalu lancip atau terlalu tumpul.

Struktur jembatan merupakan struktur yang terdiri atas gelagar, pelat lantai, dan jika ada, diafragma. Komponen-komponen ini membentuk jembatan yang memikul beban

bobot sendiri, beban superimpos dan beban hidup yang semuanya bekerja secara lateral terhadap jembatan. Dengan demikian, jembatan merupakan suatu sistem yang dinamakan grid, berupa suatu sistem pada bidang datar yang memikul beban lateral. Dengan demikian, balok gelagar dan diafragma berperan sebagai komponen balok penahan gaya-gaya akibat deformasi ragam lentur dan ragam torsi.

b. Formulasi Kekakuan Elemen Balok

Sebagai alur proses perumusan elemen hingga yang standar, terlebih dahulu akan ditetapkan model elemen yang digunakan serta penyusunan perpindahan asumtif berbasis lokal. Pada lenturan balok, selain besaran lendutan, turunan pertama lendutan (rotasi) diambil sebagai derajat kebebasan (*degrees of freedom*) dari pada sistem balok.

Selain itu, kita telah mengetahui bahwa kurvatur atau kelengkungan (*curvature*) sebagai turunan kedua fungsi perpindahan, merupakan “regangan umum (*generalized strain*)” komponen balok, dan momen lentur, yang merupakan kelengkungan dikalikan kekakuan lentur EI , merupakan “tegangan umum (*generalized stress*)” komponen balok. Dengan demikian, perpindahan asumtif berbasis lokal harus merupakan fungsi dengan turunan kedua yang menerus.

Tinjau balok lentur sepanjang L yang dimodel berupa satu segmen dengan ujung kiri 1 dan ujung kanan 2. Masing-masing titik ujung sebagai titik simpul (node) elemen memiliki dua derajat kebebasan berupa perpindahan dan rotasi, sebagai mana terlihat dalam Gambar 1.



Gambar 1: Elemen Balok Lentur

Dimana matriks kekakuan elemen balok lentur sebagai berikut.

$$[k] = \begin{bmatrix} +12EI/L^3 & +6EI/L^2 & -12EI/L^3 & +6EI/L^2 \\ & +4EI/L & -6EI/L^2 & +2EI/L \\ & & +12EI/L^3 & -6EI/L^2 \\ \text{symm.} & & & +4EI/L \end{bmatrix} \quad (1)$$

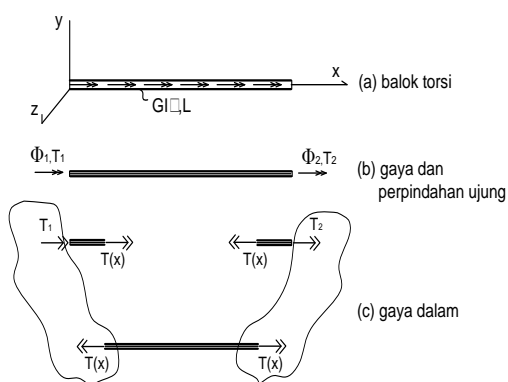
Analog dengan kasus-kasus ragam deformasi lainnya, kita mendefinisikan perpindahan dan gaya ujung serta gaya dalam yang positif seperti dalam Gambar 2.8. Perpindahan Φ dan gaya torsi ujung yang positif searah dengan sumbu positif. Untuk gaya dalam $T(x)$, yang positif adalah gaya dengan arah vektorial memiliki efek “menarik” batang seperti dalam Gambar 2(c).

Hubungan antara gaya ujung dan gaya dalam pada kedua ujung diberikan oleh

$$T_1 = -T(0) ; \quad T_2 = +T(L) \quad (2)$$

Solusi dari pada persamaan diferensial balok torsi dibagi atas dua bagian, yaitu solusi homogeny $\Phi_c(x)$ dan solusi partikuler $\Phi_p(x)$ yang memenuhi

$$\begin{aligned} GI_{\rho x} \frac{d^2}{dx^2} \Phi_c(x) &= 0 & (a) \\ GI_{\rho x} \frac{d^2}{dx^2} \Phi_p(x) &= -t(x) & (b) \end{aligned} \quad (3)$$



Gambar 2: Elemen Torsi

Solusi persamaan diferensial homogen dalam Persamaan (2.33a) mengambil bentuk

$$\Phi_c(x) = c_1 x + c_2 \quad (4)$$

dengan syarat batas natural

$$\Phi_c(0) = \Phi_1 ; \quad \Phi_c(L) = \Phi_2 \quad (5)$$

sehingga diperoleh

$$c_1 = \frac{1}{L}(\Phi_2 - \Phi_1); \quad c_2 = \Phi_1 \quad (6)$$

Jadi, solusi homogen menjadi

$$\Phi_c(x) = \left(1 - \frac{x}{L}\right) \Phi_1 + \frac{x}{L} \Phi_2 \quad (7)$$

yang memberikan

$$\Gamma(x) = \frac{d}{dx} \Phi_c(x) = -\frac{1}{L} \Phi_1 + \frac{1}{L} \Phi_2 \quad (a) \quad (8)$$

$$T(x) = GI_{\rho x} \Gamma(x) = -\frac{GI_{\rho x}}{L} \Phi_1 + \frac{GI_{\rho x}}{L} \Phi_2 \quad (b)$$

Gaya-gaya ujung menjadi

$$T_1 = -T(0) = +\frac{GI_{\rho x}}{L} \Phi_1 - \frac{GI_{\rho x}}{L} \Phi_2 \quad (a) \quad (9)$$

$$T_2 = +T(L) = -\frac{GI_{\rho x}}{L} \Phi_1 + \frac{GI_{\rho x}}{L} \Phi_2 \quad (b)$$

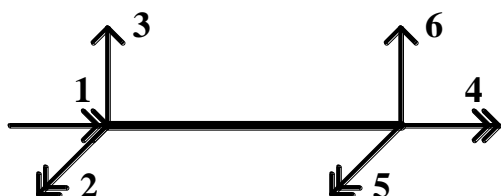
yang dapat disusun dalam matriks sebagai berikut.

$$\begin{bmatrix} +\frac{GI_{\rho x}}{L} & -\frac{GI_{\rho x}}{L} \\ -\frac{GI_{\rho x}}{L} & +\frac{GI_{\rho x}}{L} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Phi_1 \\ \Phi_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{Bmatrix} \quad (10)$$

Matriks kekakuan elemen balok lentur-torsi dalam Gambar 2 dimodifikasi dengan menggabungkan kekakuan lentur dalam Persamaan (1) dan kekakuan torsi dalam Persamaan (10) didapatkan hasil pada Persamaan (11) dan gaya-perpindahan elemen dapat dilihat pada Gambar 3.

$$k_s = \begin{bmatrix} \frac{E}{(2(1+\nu))} \frac{I_{yy}}{L} & 0 & 0 & -\left(\frac{E}{(2(1+\nu))} \frac{I_{yy}}{L}\right) & 0 & 0 \\ 0 & \frac{4EI_{xx}}{L} & \frac{6EI_{xx}}{L^2} & 0 & \frac{2EI_{xx}}{L} & -\frac{6EI_{xx}}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI_{xx}}{L^2} & \frac{12EI_{xx}}{L^3} & 0 & \frac{6EI_{xx}}{L^2} & -\frac{12EI_{xx}}{L^3} \\ -\left(\frac{E}{(2(1+\nu))} \frac{I_{yy}}{L}\right) & 0 & 0 & \left(\frac{E}{(2(1+\nu))} \frac{I_{yy}}{L}\right) & 0 & 0 \\ 0 & \frac{2EI_{xx}}{L} & \frac{6EI_{xx}}{L^2} & 0 & \frac{4EI_{xx}}{L} & -\frac{6EI_{xx}}{L^2} \\ 0 & -\frac{6EI_{xx}}{L^2} & -\frac{12EI_{xx}}{L^3} & 0 & -\frac{6EI_{xx}}{L^2} & \frac{12EI_{xx}}{L^3} \end{bmatrix} \quad (11)$$

Symetric



Gambar 3: Gaya dan Perpindahan Elemen Balok - Torsi

c. Formulasi Kekakuan Elemen Pelat

Elemen pelat ini merupakan model peralihan yang berbasiskan pada teori pelat lentur Kirchhoff. Elemen pelat lentur ini hanya berlaku pada pelat tipis dan sangat terbatas penggunaannya karena bentuknya harus selalu persegi dengan 4 nodal dan 3derajat kebebasan per nodal I yaitu w_i, θ_{xi} dan θ_{yi} . Elemen ini diperkenalkan oleh Melosh, Zienkiewicz dan Cheung, dan karenanya dinamakan MZC (Katili, 2003).

Matriks kekakuan elemen dapat dihitung dengan persamaan berikut:

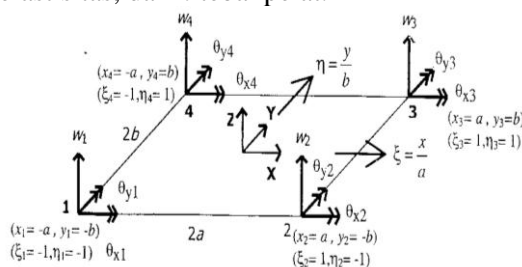
$$[K_b] = \int_{-a}^a \int_{-b}^b [B_b]^T [H_b] [B_b] dy dx = ab \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 [B_b]^T [H_b] [B_b] dd$$

$$= D_b ([k_{b1}] + [k_{b2}] + [k_{b3}] + [k_{b4}]) \quad (12)$$

$$[H_b] = D_b \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \nu \end{bmatrix}; D_b = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \quad (13)$$

$$\lambda = \frac{1-\nu}{2}$$

di mana ν adalah rasio Poisson, E modulus elastisitas, dan h tebal pelat.



Gambar 4: Pelat Lentur Model Kirchhoff

Matriks kekakuan $[K_b]$ tersebut dihitung secara integral analitik dan bukan integrasi numerik. Matriks $[K_{b1}]$, $[K_{b2}]$, $[K_{b3}]$, $[K_{b4}]$ bukanlah kekakuan elemen pada nodal melainkan dekomposisi matriks kekakuan elemen agar memudahkan penulisannya, di mana matriks tersebut berbentuk sebagai berikut.

$$[k_{b1}] = \frac{b}{6a^3} \begin{bmatrix} 6 & 0 & 0 & -6a & 0 & 8a^2 & -6 & 0 & 6a & 6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -6a & 0 & 4a^2 & 6a & 0 & 8a^2 & 3 & 0 & -3a & -3 & 0 & -3a & -6 & 0 & -6a & 6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -3a & 0 & 2a^2 & 3a & 0 & 4a^2 & 6a & 0 & 8a^2 & 3 & 0 & -3a & -3 & 0 & -3a & -6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -3a & 0 & 4a^2 & 3a & 0 & 2a^2 & 6a & 0 & 4a^2 & -6a & 0 & 8a^2 & 3 & 0 & -3a & -3 \end{bmatrix}$$

$$[k_{b2}] = \frac{a}{6b^3} \begin{bmatrix} 6 & 6b & 8b^2 & 0 & 0 & 0 & 3 & 3b & 0 & 6 & 3b & 4b^2 & 0 & 6b & 8b^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -3 & -3b & 0 & -6 & -6b & 0 & 6 & 3b & 2b^2 & 0 & 6b & 4b^2 & 0 & -6b & 8b^2 \\ -3 & -3b & 0 & -6 & -6b & 0 & 6 & 3b & 2b^2 & 0 & 6b & 4b^2 & 0 & -6b & 8b^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -6 & -6b & 0 & -3 & -3b & 0 & 3 & -3b & 0 & 3 & -3b & 0 & 3 & -3b & 0 & 6 & 6b & 4b^2 & 0 & 3b & 2b^2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[k_{b3}] = \frac{\nu}{2ab} \begin{bmatrix} 1 & b & 0 & -a & -2ab & 0 & -1 & -b & 0 & 1 & -b & 0 & 0 & b & 0 & 0 & 0 & 0 & a & 2ab & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & -a & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -a & 0 & 0 & 0 & a & -2ab & 0 & -1 & 0 & a & 1 & 0 & 0 & -1 & b & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -a & 2ab \end{bmatrix}$$

$$[k_{b4}] = \frac{\lambda}{15ab} \begin{bmatrix} 21 & 3b & 8b^2 & -3a & 0 & 8a^2 & -21 & -3b & 3a & 21 & -3b & -8b^2 & 0 & 3b & 8b^2 & -3a & 0 & -2a^2 & 3a & 0 & 8a^2 \\ 21 & 3b & -3a & -21 & -3b & -3a & 21 & 3b & -2b^2 & 0 & 3b & -2b^2 & 0 & -3b & 8b^2 & 3a & 0 & 2a^2 & -3a & 0 & -8a^2 \\ -21 & -3b & 3a & 21 & 3b & 3a & -21 & -3b & 3a & 21 & 3b & 3a & -21 & -3b & -3a & 21 & 3b & -2b^2 & 0 & -3b & 8b^2 \\ 3b & -2b^2 & 0 & -3b & 2b^2 & 0 & 3b & -8b^2 & 0 & -3b & 8b^2 & 0 & -3b & -8b^2 & 0 & -3b & 8b^2 & 0 & -3b & 8b^2 & 0 \\ 3a & 0 & -8a^2 & -3a & 0 & 2a^2 & 3a & 0 & -2a^2 & -3a & 0 & 8a^2 & -21 & -3b & 3a & 21 & 3b & 3a & -21 & -3b & -3a \end{bmatrix}$$

d. Beban Ekuivalen Elemen

Dalam pembahasan awal telah diutarakan bahwa metoda elemen hingga mengkaitkan komponen gaya dan perpindahan pada

titik simpul. Dengan demikian, elemen hingga hanya mengenal gaya-gaya dan perpindahan pada titik simpul. Dalam pada itu, beban badan dan traksi permukaan bekerja tidak pada titik simpul. Oleh karena itu, dalam metoda elemen hingga, gaya-gaya luar yang bekerja dalam elemen perlu dirobah menjadi gaya ekuivalen yang bekerja pada titik simpul. Berikut ini disajikan penyusunan beban ekuivalen balok dan beban ekuivalen pelat.

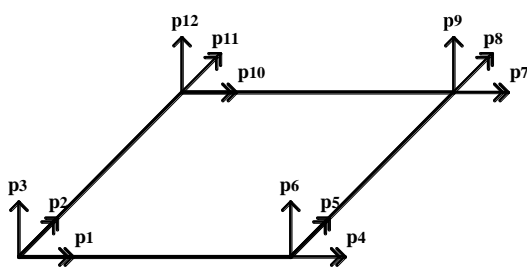
Beban elemen balok dalam kasus penelitian ini adalah beban mati yang dianggap bekerja sebagai gaya merata pada sisi atas balok, di samping beban hidup merata.

$$\begin{aligned} p_1 &= qL/2; p_2 = -qL^2/12; \\ p_3 &= qL/2; p_4 = qL^2/12 \end{aligned} \quad (14)$$

Beban ekuivalen yang bekerja elemen pelat sebagai berikut,

$$\begin{aligned} p_1 &= +qab^2/24; p_2 = -qa^2b/24; p_3 = +qab/4; \\ p_4 &= +qab^2/24; p_5 = +qa^2b/24; p_6 = +qab/4; \\ p_7 &= -qab^2/24; p_8 = +qa^2b/24; p_9 = +qab/4; \\ p_{10} &= -qab^2/24; p_{11} = -qa^2b/24; p_{12} = +qab/4 \end{aligned} \quad (15)$$

dengan urutan komponen gaya ekuivalen seturut dengan derajat kebebasan dalam Gambar 5.



Gambar 5: Urutan Penomoran Derajat Kebebasan Pelat

3. ANALISIS SISTEM STRUKTUR

Analisis suatu struktur dapat menggunakan metoda-metoda analisis yang tersedia, seperti metoda gaya dan metoda perpindahan. Metoda gaya memilih komponen gaya sebagai besaran yang tidak diketahui. Dengan mengasumsikan suatu pola gaya yang secara statis seimbang, diterapkan kriteria keserasian perpindahan untuk menyusun persamaan simultan yang mengkaitkan komponen gaya terhadap komponen

perpindahan yang melibatkan matriks fleksibilitas. Orde dari pada persamaan simultan ini ditentukan oleh ketidak-tentuan statis dan komponen gaya kelebihan yang dipilih. Ini berarti bahwa ketidak-tentuan statis sistem struktur tidak berubah untuk model diskrit struktur, namun berbeda untuk kombinasi gaya kelebihan yang berbeda, sehingga matriks fleksibilitas berorde tetap namun dengan bentuk yang berbeda. Untuk orde ketidak-tentuan statis, terdapat kombinasi pilihan gaya kelebihan yang dapat diterapkan, dan pilihan ini harus dilaksanakan secara manual. Dengan demikian, metoda gaya kurang cocok diterapkan dalam analisis struktur yang dalam konteks penuangan analisis sistem struktur dalam suatu program komputer yang cenderung bersifat otomatis.

Metoda perpindahan memilih komponen perpindahan sebagai besaran yang tidak diketahui. Dengan mengasumsikan suatu pola perpindahan yang secara kinematis dimungkinkan (*kinematically admissible*), dengan kriteria keseimbangan disusun persamaan simultan yang mengkaitkan komponen perpindahan terhadap komponen gaya yang melibatkan matriks kekakuan. Orde dari pada persamaan simultan ini ditentukan oleh ketidak-tentuan kinematis sistem struktur yang nota bene ditentukan oleh model diskrit struktur. Namun, begitu model diskrit yang mewakili sistem struktur dipilih, komponen perpindahan telah diketahui dan matriks kekakuan otomatis dapat ditentukan. Ini berarti bahwa begitu model diskrit ditentukan, bentuk vektor perpindahan telah ditetapkan dan tidak perlu dipilih. Inilah alasan kenapa metoda perpindahan lebih cocok diterapkan ketimbang metoda gaya dalam konteks penuangan analisis sistem struktur dalam suatu program komputer yang cenderung bersifat otomatis.

Analisis dengan metoda perpindahan memulai proses dengan mengambil suatu pola perpindahan yang secara kinematis dan serasi. Akibat perpindahan yang diasumsikan ini, kemudian gaya-gaya diseimbangkan dan persamaan yang tersusun atas dasar keseimbangan ini kemudian diselesaikan secara simultan untuk menghitung komponen perpindahan. Karena kriteria yang digunakan untuk menyusun persamaan global berdasarkan keseimbangan, metoda perpindahan dinamakan juga sebagai metoda keseimbangan.

Bahasan mengenai metoda analisis struktur dengan matriks kekakuan disarikan dalam urutan langkah sebagai berikut.

1. Tentukan model diskrit serta jenis elemen-elemen yang akan digunakan untuk mewakili struktur yang sebenarnya di dalam analisis. Tetapkan jumlah elemen, jumlah titik simpul serta derajat kebebasan aktif.
2. Untuk masing-masing elemen, lakukan langkah-langkah berikut ini.
 - a. Susun matriks kekakuan $[k_i]$, matriks rotasi $[R_i]$ dan vektor gaya ekuivalen $\{P_i^e\}$
 - b. Rotasikan matriks kekakuan dan vektor gaya ekuivalen ke tata sumbu global,

$$[K_i] = [R_i]^T [k_i] [R_i]$$

$$\{P_i^e\} = [R_i]^T \{P_i^e\}$$
 - c. Rakitkanlah matriks kekakuan dan vektor gaya ekuivalen ke dalam matriks kekakuan dan vektor gaya.
3. Di akhir proses langkah 2, didapatkan persamaan global yang siap disolusikan,

$$[K_s]\{U_s\} = \{P_s\}$$
4. Solusikanlah persamaan untuk mendapatkan vektor perpindahan struktur $\{U_s\}$ yang siap digunakan untuk menentukan perpindahan dan gaya reaksi elemen-elemen seperti dalam langkah berikut.
5. Untuk masing-masing elemen, lakukan langkah-langkah berikut ini.
 - a. Untuk elemen ke-i, susun vektor perpindahan $\{U_i\}$ dalam tata sumbu global,

$$\{U_i\} = [T_i]\{U_s\}$$
 - b. Rotasikan vektor perpindahan elemen dari tata sumbu global ke tata sumbu lokal,

$$\{u_i\} = [R_i]\{U_i\} \quad (3.22)$$
 - c. Hitung vektor gaya elemen dalam tata sumbu lokal,

$$\{P_i\} = -\{P_i^0\} + [k_i]\{u_i\}$$

satu program paket komputer. Pada dasarnya pemrograman merupakan serangkaian perintah yang terstruktur dan sistematis disampaikan kepada komputer. Bahasa tinggi yang dipakai dalam penyusunan program paket adalah FORTRAN (*FORmula TRANslation*). Bahasa Fortran merupakan bahasa program tingkat tinggi, perintah-perintahnya sudah dibuat dalam bahasa yang mudah dimengerti oleh pengguna, dan bahasa ini kemudian diterjemahkan ke dalam bahasa rendah komputer (*assembler*).

Kerangka dasar penyusunan program dibuat berdasarkan prosedur analisis struktur yang telah ditentukan. Untuk mempermudah penyusunan dan pengecekan kesalahan (*debugging*), program dibuat terdiri atas satu program utama yang memperkerjakan beberapa *subroutine* yang masing-masing mengerjakan operasi tertentu. Susunan program utama dan *subroutine-subroutine* diatur berdasarkan algoritma dan diagram alir (*flowchart*) yang khusus disusun seturut dengan algoritma analisis struktur.

Rancangan suatu program harus dibuat secara sistematis, terstruktur, dan efisien. Maka dari itu dibuat langkah-langkah perancangan program yaitu perumusan masalah, penyusunan algoritma dan penyusunan diagram alir (*flowchart*). Perumusan masalah merupakan proses untuk mendeskripsikan masalah serta penjabaran masalah tersebut dalam bentuk yang lebih spesifik yaitu menentukan bagian-bagian yang masuk dalam kategori input, proses dan output. Algoritma merupakan langkah-langkah yang harus dilakukan dalam menyelesaikan masalah. Langkah-langkah ini harus sistematis dan terstruktur sedemikian hingga penyelesaian masalah diperoleh sesuai dengan yang diinginkan. (3.20)

Diagram alir merupakan gambaran atau notasi tentang alur (pola pikir) program komputer yang akan dibuat. Diagram alir memegang peranan penting baik dalam menyusun program komputer maupun pada saat pengecekan ulang jika program komputer mempunyai kesalahan. Tahap-tahap pemrograman dapat dilihat dalam gambar diagram blok berikut. (3.23)

4. PEMOGRAMAN KOMPUTER

Penuangan algoritma analisis struktur dituliskan dalam formulasi matriks, ke dalam



Gambar 6: Diagram Blok Program

Program analisis struktur yang dihasilkan dalam penelitian ini dinamakan GRID.FOR. Program ini terdiri dari gabungan dari satu program utama dan beberapa sub program yang mempunyai fungsi masing-masing. Program diawali dengan pembacaan data input, kemudian penentuan derajat kebebasan struktur, perakitan matriks global, memasukkan data beban dan selanjutnya solusi dilakukan sehingga diperoleh perpindahan, gaya dalam dan tegangan. Keluaran (*output*) yang dicetak berupa perpindahan, dan gaya dalam.

Program terdiri atas tiga tipe data yaitu program sumber (*source code*), data masukan (*input data*), dan data keluaran (*output data*). Program sumber mengambil data pada data masukan, kemudian diolah pada program sumber dan kemudian dihasilkan data keluaran yang akan dianalisis sesuai dengan studi kasus yang telah ditentukan.

Validasi Program

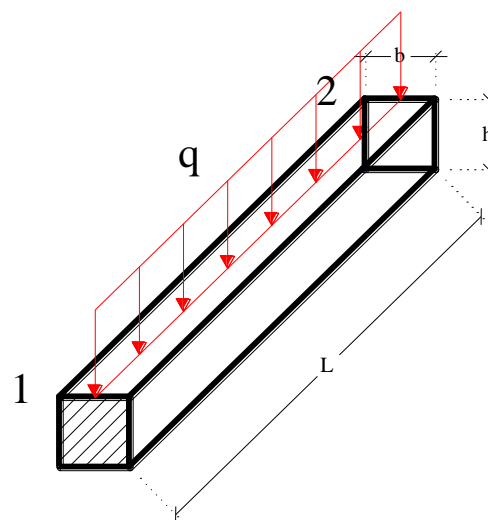
Program GRID.FOR yang telah disusun perlu diperiksa dalam hal kebenaran dan

ketelitian keluaran yang dihasilkan. Dalam hal ini, program diuji coba terhadap analisis 4 struktur, yaitu: (a) balok kantilever tunggal, (b) balok kantilever dengan beban ujung terpusat, (c) struktur pelat lentur tunggal, dan (d) struktur pelat lentur beban ujung terpusat. Struktur pertama berfungsi sebagai validasi elemen balok dalam program, struktur kedua berfungsi sebagai validasi elemen pelat lentur, dan struktur ketiga berfungsi sebagai validasi bahwa pelat lentur dengan lebar sempit akan menghasilkan solusi yang identik dengan struktur balok lentur dalam struktur pertama.

1. Balok Kantilever Tunggal

Balok kantilever tunggal dengan panjang 3.0 meter dan penampang berukuran lebar 0.3 meter dan tinggi 0.3 meter, dijepit pada ujung 1 dan bebas pada ujung 2, seperti dalam Gambar 4.3. Beban merupakan beban merata sebesar $q = -2160 \text{ N/m}$.

Hasil yang diperoleh dibandingkan dengan hasil keluaran solusi eksak balok, disandingkan dalam Tabel 2. Dari tabel terlihat bahwa hasil keluaran dari penerapan program tersebut bernilai sama dengan hasil keluaran analisis eksak balok lentur.



Gambar 7: Balok Kantilever Tunggal

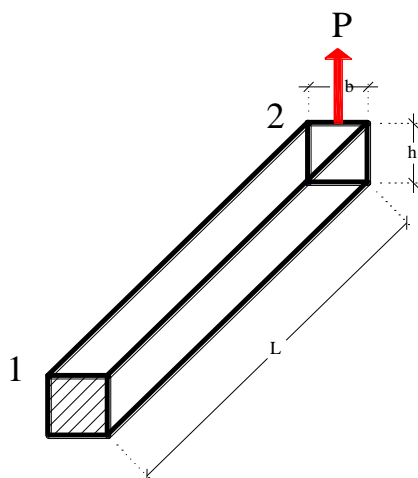
Tabel 2: Perbandingan Hasil Validasi Struktur 1

Keluaran	Hasil	
	Eksak	Program
perpindahan ujung bebas	-0.00162 m	-0.00162 m
momen jepit ujung kiri	-9720 N-m	-9720 N-m
gaya lintang ujung kiri	6480 N	6480 N

2. Balok Kantilever Dengan Beban Ujung Terpusat

Balok kantilever dengan panjang 3.0 meter dan penampang berukuran lebar 0.3 meter dan tinggi 0.3 meter, dijepit pada ujung 1 dan bebas pada ujung 2, seperti dalam Gambar 4.3. Beban merupakan beban ujung terpusat sebesar $P=1000$ N.

Hasil yang diperoleh dibandingkan dengan hasil keluaran solusi eksak balok, disandingkan dalam Tabel 3. Dari tabel terlihat bahwa hasil keluaran dari penerapan program tersebut bernilai sama dengan hasil keluaran analisis eksak balok lentur.



Gambar 8: Balok Kantilever Dengan Beban Ujung Terpusat

Tabel 3:Perbandingan Hasil Validasi Struktur 2

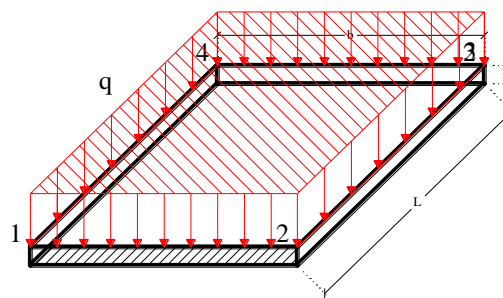
Keluaran	Hasil	
	Eksak	Program
perpindahan ujung bebas	0.000666 m	0.000666 m
momen jepit ujung kiri	3000 N-m	3000 N-m
gaya lintang ujung kiri	-1000 N	-1000 N

3. Struktur Pelat Lentur Tunggal

Struktur pelat lentur tunggal dengan bentang 3.0 meter dan lebar 3.0 meter serta tebal 0.3 meter dijepit pada sisi 1-2 seperti dalam Gambar 4.5. Beban merupakan beban merata sebesar $q=-216.0$ N/m².

Perlu ditambahkan bahwa struktur pelat ini adalah identik dengan struktur 1 yang menggunakan balok. Dalam artian, pelat ini seyogyanya memberikan hasil keluaran yang identik dengan balok. Hasil yang diperoleh dibandingkan dengan hasil keluaran solusi eksak pelat lentur, disandingkan dalam Tabel 4. Dari tabel terlihat bahwa hasil keluaran

dari penerapan program tersebut bernilai sama, hanya pada perpindahan ujung bebas cukup dekat dengan hasil keluaran analisis eksak balok lentur. Perbedaan hanya berkisar 0.00013 m. Ini disebabkan perbedaan antara kekakuan balok EI dan kekakuan pelat lentur $Eh^3/[12(1-\nu^2)]$.



Gambar 9: Struktur Pelat Lentur Tunggal

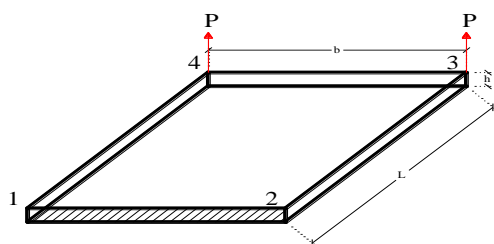
Tabel 4:Perbandingan Hasil Validasi Struktur 3

Keluaran	Hasil	
	Eksak	Program
perpindahan ujung bebas	-0.00162 m	-0.00149 m
momen jepit ujung kiri	-9720 N-m	-9719.9 N-m
gaya lintang ujung kiri	6480 N	6480 N

4. Struktur Pelat Lentur Beban Ujung Terpusat

Struktur pelat lentur dengan bentang 3.0 meter dan lebar 0.3 meter serta tebal 0.3 meter dijepit pada sisi 1-2 seperti dalam Gambar 4.5. Beban merupakan beban ujung terpusat pada node 3 dan 4 sebesar $P=500$ N.

Struktur pelat ini adalah identik dengan struktur 2 yang menggunakan balok yang seyogyanya memberikan hasil keluaran yang identik dengan balok. Dari tabel 5 terlihat bahwa hasil keluaran dari penerapan program tersebut cukup mendekati, perbedaan hanya berkisar 0.003%. Hanya pada momen jepit ujung kiri terjadi perbedaan, hal tersebut diakibatkan faktor kekakuan lentur pelat dengan kekakuan balok yang berbeda dan pada pelat terdapat dua aksi di arah x dan y akibat beban yang diberikan dibagi menjadi 2 titik sedangkan pada balok gaya hanya bekerja pada satu arah saja atau satu aksi.



Gambar 10: Struktur Pelat Lentur Beban Ujung Terpusat

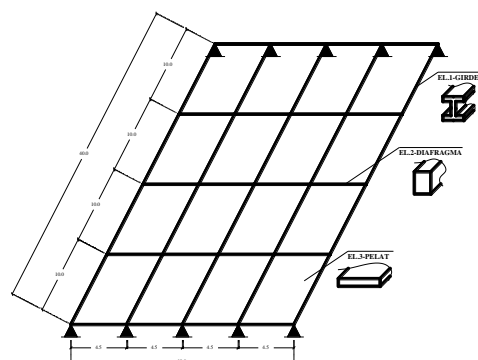
Tabel 5: Perbandingan Hasil Validasi Struktur 4

Keluaran	Hasil	
	Eksak	Program
perpindahan ujung bebas	0.000666 m	0.000621 m
momen jepit ujung kiri	3000 N-m	3863 N-m
gaya lintang ujung kiri	-1000 N	-999.7 N

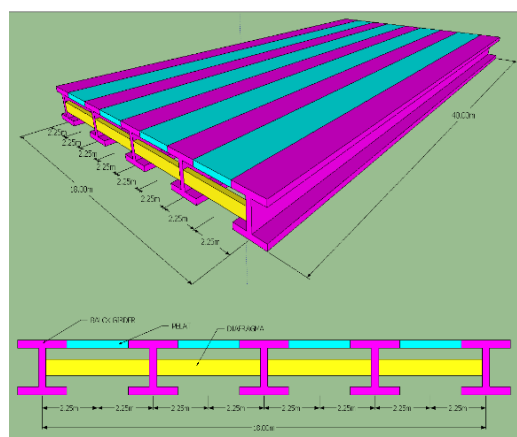
5. STUDI KASUS

Sistem struktur jembatan gelagar dengan pelat lantai yang dimodelkan dibuat dengan 3 kasus struktur, yaitu: (a) jembatan dengan gelagar dan pelat lantai tanpa diafragma, yang dinotasikan dengan T-T, (b) jembatan dengan gelagar dan pelat lantai dengan diafragma, yang dinotasikan dengan D-D, dan (c) jembatan dengan gelagar dan pelat lantai tanpa diafragma pada saat beban mati dan prategang bekerja, kemudian dipasang balok diafragma saat beban hidup bekerja, yang dinotasikan dengan T-D.

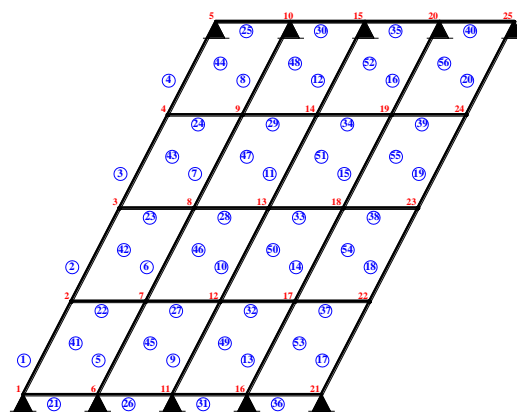
Struktur jembatan berbentuk 40.0 meter dan lebar 18.0 meter terdiri atas gelagar menerus yang terdiri atas balok prategang, pelat lentur lantai, dan dengan atau tanpa diafragma seperti terlihat dalam Gambar 5.1 dan Gambar 5.2. Di arah lebar, jembatan dibagi atas 2 jalur dengan 3 lajur @3.0 meter setiap jalur, dan menggunakan 5 gelagar balok prategang. Di arah panjang, keseluruhan bentang dibagi atas 4 sub bentang dengan balok melintang pada kedua ujung, dan dengan atau tanpa 3 diafragma. Dengan demikian, dalam model diskrit ini ada 20 balok gelagar, 8 balok perletakan, dan 12 balok diafragma. Ukuran dari komponen yang merupakan elemen hingga diberikan dalam sajian berikut ini.



Gambar 11: Elemen-Elemen Struktur Pada Sistem Grid



Gambar 12: Permodelan Jembatan Menggunakan Diafragma

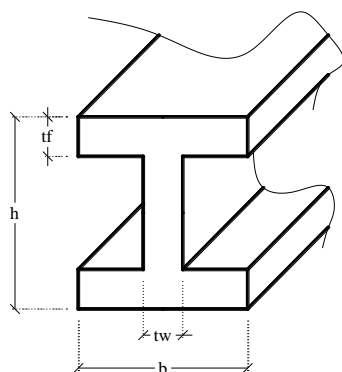


Gambar 13: Penomoran Nodal dan Elemen Jembatan

Dimensi jembatan dan dimensi penampang komponen gelagar, pelat dan diafragma diberikan sebagai berikut.

1. Dimensi Jembatan
 - Bentang jembatan (L) = 40.0 m
 - Lebar jembatan (l) = 18.0 m
 - Jarak antar girder (S) = 4.5 m
2. Dimensi Penampang Gelagar
 - Tinggi penampang (h) = 2.0 m
 - Lebar penampang (b) = 2.0 m

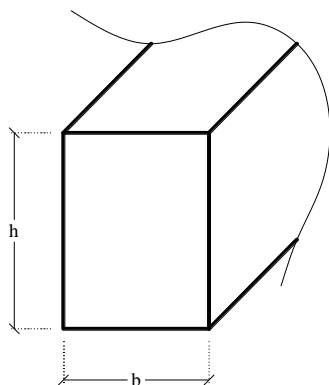
- Tebal web (t_w) = 0.3 m
- Tebal flens (t_f) = 0.3 m



Gambar 14: Model Penampang Gelagar

3. Dimensi Penampang Diafragma

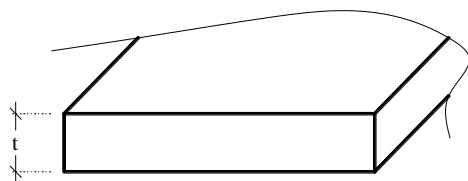
- Tinggi penampang (h) = 0.6 m
- Lebar penampang (b) = 0.3 m



Gambar 15: Model Penampang Diafragma

4. Dimensi Pelat Lentur

- Tebal pelat (t) = 0.3 m



Gambar 16: Model Penampang Pelat Lentur

a. Beban Jembatan

Beban jembatan yang diperhitungkan dalam penelitian ini mencakup (a) berat sendiri balok dan pelat lentur, (b) gaya prategang pada gelagar, (c) beban hidup.

1. Beban Mati

Beban mati merupakan beban permanen yang akan terus bekerja pada suatu jembatan.

Beban mati pada *superstructure* adalah beban gabungan dari elemen-elemen *superstructure* itu sendiri (Demetrios dan Jim, 2007). Beban mati didasarkan atas bobot sendiri beton yang dalam hal ini diambil 24000 N/m^3 . Berdasarkan hal ini, beban mati untuk komponen diambil sebagai berikut,

- Bobot mati gelagar
 $q_g = 24000 \times 1.62 \text{ N/m} = 38880.0 \text{ N/m}$
- Bobot mati diafragma
 $q_d = 24000 \times 0.18 \text{ N/m} = 4320.0 \text{ N/m}$
- Bobot mati pelat
 $q_p = 24000 \times 0.3 \text{ N/m}^2 = 7200.0 \text{ N/m}^2$

2. Beban Akibat Gaya Prategang

Pengaruh dari pada gaya prategang dapat diwakili dengan gaya merata ke atas q_f yang besarnya ditentukan dengan menggunakan rumus berikut (Lin dan Burns, 1993).

$$q_f = d^2 M(x) / dx^2 \quad (16)$$

dalam mana momen diberikan oleh

$$M(x) = F_0 \cdot e(x) \quad (17)$$

dan

$$e(x) = \frac{4e_0}{L^2} x(L-x) \quad (18)$$

Gaya prategang F_0 dan e_0 masing-masing merupakan gaya prategang dan eksentrisitas kabel pada tengah penampang yang diberikan oleh

$$F_0 = 0.5 \times \bar{f}_c \times A = 0.5 \times (0.45 \times f_c) \times 16200$$

$$F_0 = 1458000 \text{ kg} \quad (19)$$

$$e_0 = -0.9 \text{ m}$$

Pemasukan Persamaan (16) dan Persamaan (17) ke dalam Persamaan (15) memberikan

$$q_f = -8F_0 \frac{e_0}{L^2} = -8(1458000) \frac{-0.9}{40^2} = 65610 \text{ N/m}$$

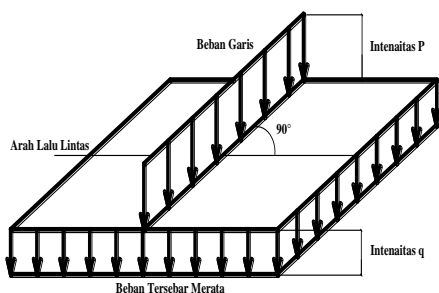
3. Beban Hidup

Menurut RSNI T-02-2005, untuk jembatan dikenakan 2 macam beban hidup, yaitu beban T untuk pelat lantai berupa tekanan gandar pada pelat, dan beban D yang terdiri atas beban merata dan beban garis melintang pada pelat. Karena yang ditinjau adalah gelagar maka yang dikerjakan adalah beban merata dan beban garis pada pelat. Lihat Gambar 5.3 sebagai penjelasan.

Untuk beban D merata dan bentang jembatan 40.0 meter > 30.0 meter, intensitas beban hidup garis adalah $q_r = 49000.0 \text{ N/m}$, sementara beban hidup merata dihitung me-

nurut rumus berikut.

$$q_D = 9000.0 \text{ N/m}^2 \times (0.5 + 15 / 40) = 7830.0 \text{ N/m}^2$$



Gambar 17: Beban Hidup D dan T Pada Jembatan

b. Analisis Struktur

Pasal ini memberikan proses analisis struktur. Pertama, ditinjau kasus yang akan dianalisis menurut kasus pembebanan dan kasus terpasang tidaknya diafragma, seperti yang disajikan dalam Tabel 6.

Tabel 6: Pengelompokan Studi Kasus

No	Kasus	Diafragma		
		A : T-T	B : T-D	C : D-D
1	Beban q_T pada diafragma 22, 23, 24 dan beban pelat q_D 42, 43	A1	B1	C1
2	Beban q_T pada diafragma 22, 23, 24, 27, 28 dan beban pelat q_D 42, 43, 46, 47	A2	B2	C2

c. Pembahasan Hasil Keluaran

Hasil keluaran yang didapatkan dari program tersebut digunakan untuk meninjau pengaruh dari pada diafragma terhadap perilaku struktur jembatan terhadap gaya luar. Pertama, ditinjau pengaruh adanya diafragma terhadap ekstensi momen pada pelat lentur untuk mengetahui retak tidaknya pelat lentur pada lokasi ekstrim. Kedua, ditinjau pengaruh adanya diafragma terhadap ekstensi perpindahan yang terjadi.

1. Pengaruh Diafragma Terhadap Kerejakan Pelat Lentur

Retak pada suatu pelat dapat diketahui dengan membandingkan momen yang terjadi pada pelat akibat beban-beban yang bekerja pada jembatan dengan momen *crack* yang terjadi. Momen *crack* pada pelat dapat dihitung dengan persamaan berikut (Wang dan Salmon, 1992).

$$M_{cr} = \frac{f_{cr} \cdot I_g}{y_t} \quad (20)$$

Pada struktur jembatan ini digunakan

parameter-parameter $f_{c'} = 40 \text{ MPa}$, $b = 4500 \text{ mm}$ dan $h = 300 \text{ mm}$ sehingga modulus runtuh beton (f_{cr}) menjadi

$$f_{cr} = 0.62 \sqrt{f_{c'}} = 0.62 \sqrt{40} = 3.9212 \text{ MPa} \quad (21)$$

Momen Inersia dari penampang (I_g) adalah

$$I_g = \frac{bh^3}{12} = \frac{4500 \times 300^3}{12} = 1.0125 \times 10^{10} \text{ mm}^4 \quad (22)$$

dan jarak dari garis netral terhadap serat tarik ekstrim adalah

$$y_t = \frac{300}{2} = 150 \text{ mm} \quad (23)$$

Pemasukan Persamaan (21), (22), dan (23) ke dalam Persamaan (20) memberikan

$$M_{cr} = \frac{3.9212 \times 1.0125 \times 10^{10}}{150} \quad (24)$$

$$M_{cr} = 264681000 \text{ Nmm} = 2.64681 \times 10^5 \text{ Nm}$$

Berdasarkan momen retak pada pelat tersebut yang dibandingkan pada hasil keluaran program dapat terlihat bahwa pada setiap kasus telah terjadi retak pada beberapa nodal akibat momen pada pelat yang melebihi nilai M_{cr} , seperti disajikan dalam tabel-tabel berikut.

Dari hasil keluaran tersebut, dapat dilihat bahwa struktur dengan penambahan elemen diafragma (kasus C1 dan C2) mengalami retak lebih sedikit dibandingkan dengan kasus lainnya yang tanpa menggunakan diafragma. Pada kasus A1 dan A2 daerah yang mengalami momen retak tersebut ketika ditambahkan diafragma pada load step ke 2 atau berubah menjadi kasus B1 dan B2 terjadi pengurangan nilai momen pada daerah tersebut. Dan berlanjut ketika struktur dari awal ditambahkan diafragma, pada daerah yang semula mengalami retak berubah menjadi tidak mengalami retak.

Berdasarkan hasil keluaran yang didapatkan, beban ekstrim terjadi pada struktur jembatan yang bekerja beban pada elemen 22, 23, 24, 27, 28, 29, 42, 43, 46 dan 47 sehingga keluaran dari struktur tersebut digunakan sebagai acuan analisis.

Tabel 7: Perbandingan Momen Pada Pelat Kasus A1
Terhadap Nilai M_{cr}

Node	Momen (Nm)	Keterangan	Node	Momen (Nm)	Keterangan
1	9.262E+05	CRACK	14	2.205E+06	CRACK
2	-6.693E+05	CRACK	15	-2.487E+06	CRACK
3	-2.766E+05	CRACK	16	1.558E+06	CRACK
4	-5.732E+05	CRACK	17	-2.247E+06	CRACK
5	-1.415E+05	CRACK	18	9.075E+05	CRACK
6	6.321E+05	CRACK	19	-2.234E+06	CRACK
7	-1.338E+06	CRACK	20	1.464E+06	CRACK
8	8.219E+05	CRACK	21	1.477E+05	SAFE
9	-1.487E+06	CRACK	22	1.856E+05	SAFE
10	1.016E+06	CRACK	23	1.613E+05	SAFE
11	-2.318E+06	CRACK	24	2.592E+05	SAFE
12	2.012E+06	CRACK	25	2.770E+05	CRACK
13	-1.504E+06	CRACK			

Tabel 8: Perbandingan Momen Pada Pelat Kasus A2
Terhadap Nilai M_{cr}

Node	Momen (Nm)	Keterangan	Node	Momen (Nm)	Keterangan
1	-7.083E+05	CRACK	14	-2.718E+06	CRACK
2	7.219E+05	CRACK	15	1.673E+06	CRACK
3	2.317E+05	SAFE	16	-2.311E+06	CRACK
4	6.495E+05	CRACK	17	1.188E+06	CRACK
5	-4.602E+05	CRACK	18	-1.121E+06	CRACK
6	-7.259E+05	CRACK	19	1.369E+06	CRACK
7	1.075E+06	CRACK	20	-2.154E+06	CRACK
8	-7.039E+05	CRACK	21	-2.590E+04	SAFE
9	1.265E+06	CRACK	22	-9.530E+04	SAFE
10	-1.093E+06	CRACK	23	2.054E+05	SAFE
11	1.468E+06	CRACK	24	-1.346E+05	SAFE
12	-2.612E+06	CRACK	25	-2.010E+05	SAFE
13	1.090E+06	CRACK			

Tabel 9: Perbandingan Momen Pada Pelat Kasus B1
Terhadap Nilai M_{cr}

Node	Momen (Nm)	Keterangan	Node	Momen (Nm)	Keterangan
1	6.482E+05	CRACK	14	1.479E+06	CRACK
2	2.783E+05	CRACK	15	-1.895E+06	CRACK
3	-2.666E+05	CRACK	16	1.019E+06	CRACK
4	-3.287E+05	CRACK	17	-1.749E+06	CRACK
5	4.493E+05	CRACK	18	6.141E+05	CRACK
6	3.644E+05	CRACK	19	-1.716E+06	CRACK
7	-1.086E+06	CRACK	20	9.595E+05	CRACK
8	5.129E+05	CRACK	21	1.363E+05	SAFE
9	-1.188E+06	CRACK	22	1.434E+05	SAFE
10	6.401E+05	CRACK	23	-1.533E+05	SAFE
11	-1.780E+06	CRACK	24	1.989E+05	SAFE
12	1.330E+06	CRACK	25	2.080E+05	SAFE
13	-1.168E+06	CRACK			

Tabel 10: Perbandingan Momen Pada Pelat Kasus B2
Terhadap Nilai M_{cr}

Node	Momen (Nm)	Keterangan	Node	Momen (Nm)	Keterangan
1	7.440E+05	CRACK	14	1.329E+06	CRACK
2	-3.180E+05	CRACK	15	-2.056E+06	CRACK
3	-2.622E+05	SAFE	16	7.937E+05	CRACK
4	-2.519E+05	SAFE	17	-2.033E+06	CRACK
5	5.570E+05	CRACK	18	4.718E+05	CRACK
6	5.029E+05	CRACK	19	-1.964E+06	CRACK
7	-8.943E+05	CRACK	20	7.569E+05	CRACK
8	6.809E+05	CRACK	21	1.379E+05	SAFE
9	-9.795E+05	CRACK	22	1.498E+05	SAFE
10	7.750E+05	CRACK	23	-1.498E+05	SAFE
11	-1.940E+06	CRACK	24	2.127E+05	SAFE
12	1.159E+06	CRACK	25	1.969E+05	SAFE
13	-1.195E+06	CRACK			

Tabel 11: Perbandingan Momen Pada Pelat Kasus C1
Terhadap Nilai M_{cr}

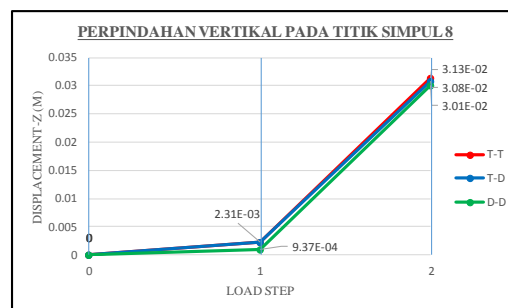
Node	Momen (Nm)	Keterangan	Node	Momen (Nm)	Keterangan
1	1.358E+05	SAFE	14	-2.961E+05	CRACK
2	2.653E+05	CRACK	15	-3.037E+05	CRACK
3	-2.469E+05	SAFE	16	-3.593E+05	CRACK
4	-2.654E+05	CRACK	17	-3.978E+05	CRACK
5	-1.356E+05	SAFE	18	-2.311E+05	CRACK
6	-1.459E+05	SAFE	19	-3.169E+05	CRACK
7	2.628E+05	SAFE	20	-3.258E+05	CRACK
8	2.476E+05	SAFE	21	5.553E+04	SAFE
9	-2.624E+05	SAFE	22	1.318E+05	SAFE
10	-1.458E+05	SAFE	23	-1.301E+05	SAFE
11	-3.321E+05	CRACK	24	-1.336E+05	SAFE
12	-3.314E+05	CRACK	25	-1.389E+05	SAFE
13	-2.337E+05	SAFE			

Tabel 12: Perbandingan Momen Pada Pelat Kasus C2
Terhadap Nilai M_{cr}

Node	Momen (Nm)	Keterangan	Node	Momen (Nm)	Keterangan
1	1.364E+05	SAFE	14	-4.449E+05	CRACK
2	2.631E+05	SAFE	15	-4.566E+05	CRACK
3	-2.425E+05	SAFE	16	-5.776E+05	CRACK
4	2.661E+05	CRACK	17	-6.707E+05	CRACK
5	-1.363E+05	SAFE	18	-3.976E+05	CRACK
6	1.339E+05	SAFE	19	-5.551E+05	CRACK
7	2.463E+05	SAFE	20	-5.220E+05	CRACK
8	2.254E+05	SAFE	21	1.405E+05	SAFE
9	-2.447E+05	SAFE	22	1.299E+05	SAFE
10	-1.340E+05	SAFE	23	-1.267E+05	SAFE
11	-4.836E+05	CRACK	24	-1.324E+05	SAFE
12	-4.988E+05	CRACK	25	-1.403E+05	SAFE
13	-2.955E+05	CRACK			

2. Pengaruh Diafragma Terhadap Perpindahan

Pengaruh dari adanya diafragma dibahas dalam paparan berikut. Pertama, kita menggambarkan perpindahan pada titik simpul 8 untuk ketiga kasus, yaitu kasus T-T, kasus T-D, dan kasus D-D dengan hasil plot seperti dalam Gambar 5.8. Perhatikan bahwa kekakuan pada kasus D-D jauh lebih besar dibandingkan dengan kasus T-T, sehingga perpindahan vertikal titik 8 pada kasus D-D jauh lebih kecil dibandingkan dengan pada kasus T-T, perpindahan direduksi hingga 16%. Kekakuan pada kasus T-D sama dengan kekakuan kasus T-T pada level pembebanan pertama, dan sama dengan kekakuan kasus D-D pada level pembebanan kedua. Dengan perkataan lain, perilaku kasus T-D merupakan jenis semi linier (*piece wise linear*).

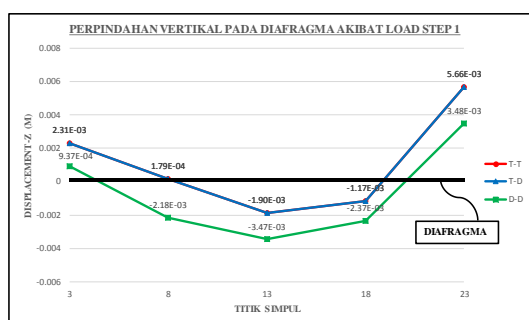


Gambar 18: Plot Perpindahan Vertikal Pada Titik Simpul 3

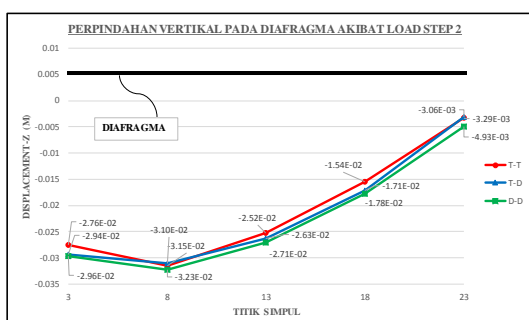
Kedua, pengaruh dari pada adanya diafragma terhadap ekstensi perpindahan vertikal jembatan dibahas dalam paparan berikut. Pengaruh ini dapat didemonstrasikan dengan melakukan plot perpindahan pada diafragma yang digambarkan oleh garis pada titik kumpul 3-8-13-18-23. Pertama, data-data perpindahan vertikal titik-titik simpul tersebut untuk level pembebanan pertama dan pembebanan kedua ditabulasi dalam Tabel 13. Kemudian, data ini digunakan untuk menggambarkan perpindahan vertikal struktur di sepanjang garis 3-8-13-18-23. Plot perpindahan vertikal ini disajikan dalam Gambar 19 dan Gambar 20.

Tabel 13: Perpindahan Struktur Pada Diafragma Garis 3-23

NODAL	LOAD STEP 1			LOAD STEP 2		
	KASUS			KASUS		
	T-T	T-D	D-D	T-T	T-D	D-D
3	2.31E-03	2.31E-03	9.37E-04	-2.76E-02	-2.94E-02	-2.94E-02
8	1.79E-04	1.79E-04	-2.11E-03	-3.15E-02	-3.15E-02	-3.23E-02
13	-1.90E-03	-1.90E-03	-3.47E-03	-2.52E-02	-2.63E-02	-2.71E-02
18	-1.17E-03	-1.17E-03	-2.37E-03	-1.54E-02	-1.71E-02	-1.78E-02
23	5.66E-03	5.66E-03	3.48E-03	-3.29E-03	-3.06E-03	-4.93E-03



Gambar 19: Plot Perpindahan Vertikal Pada Diafragma Akibat Load Step 1



Gambar 20: Plot Perpindahan Vertikal Pada Diafragma Akibat Load Step 2.

Mengomentari hasil plot dalam Gambar 19 dan Gambar 20, maka apa yang terjadi adalah bahwa level pembebanan pertama mencakup berat sendiri dan gaya prategang. Adanya gaya prategang pada semua gelagar

memberikan perpindahan yang hampir se-ragam ke atas pada garis 3-23. Perpindahan ini kemudian diimbangi oleh perpindahan ke bawah akibat berat sendiri gelagar, diafragma (jika ada) dan pelat lentur. Hasil perpindahan pada level pembebanan pertama dengan demikian juga hampir merata di sepanjang garis tersebut, kecuali pada titik 3 dan 23 pada mana gelagar hanya mendukung setengah lebar lajur pelat. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa pengaruh dari pada penggunaan diafragma pada level pembebanan pertama tidak begitu mempengaruhi perpindahan struktur.

Pada level pembebanan kedua, ekstensi perpindahan diperbesar oleh beban hidup T pada diafragma dan beban hidup D pada pelat. Perpindahan pada level pembebanan kedua ini relatif jauh lebih besar dibandingkan dengan perpindahan pada level pembebanan pertama. Kemudian, untuk pola perpindahan ketiga kasus T-T, T-D dan D-D untuk level pembebanan kedua tidak begitu mempengaruhi ekstensi perpindahan sepanjang garis 3-23; namun, adanya diafragma lebih menyeragamkan perpindahan di sepanjang garis tersebut. Dengan perkataan lain, untuk level pembebanan kedua, diafragma terbukti memberikan efek gandeng atau ikatan antara sesama gelagar, sedemikian hingga differensi antara perpindahan gelagar dikurangi dan ekstensi keretakan pelat lentur dikurangi.

6. PENUTUP

Sebagai penutup dari tulisan ini maka berikut ini diberikan kesimpulan serta beberapa saran.

a. Kesimpulan

1. Penambahan elemen diafragma pada sistem struktur jembatan memberikan kekakuan tambahan pada struktur jembatan tersebut.
2. Peningkatan kekakuan mengakibatkan pengurangan perpindahan dalam struktur jembatan.
3. Adanya diafragma mengakibatkan pengurangan gaya-gaya dalam (momen, lentur dan torsi) pada elemen struktur, dan mencegah terjadinya retak pada pelat.
4. Diafragma berperan sebagai pengikat dari elemen balok gelagar, hal tersebut

dapat dilihat dengan lebih seragamnya perpindahan (*displacement*) yang terjadi pada balok gelagar yang bersebelahan.

5. Adanya diafragma dengan demikian juga akan lebih mendistribusikan gaya-gaya luar secara lebih merata atas semua komponen jembatan.

b. Saran

1. Program dapat dikembangkan untuk dapat diterapkan terhadap jenis jembatan lain, misalnya jembatan gantung (*suspension bridge*), jembatan *cable stayed*, dan lain-lain.
2. Untuk dapat lebih mengakomodir jenis elemen yang berbeda, program dapat lebih disempurnakan untuk menjamin kompatibilitas antara elemen yang bersebelahan via matriks transformasi.
3. Melihat pengaruh positif dari penggunaan diafragma, maka disarankan untuk menambahkan diafragma pada jembatan yang belum menggunakannya, dengan menggunakan diafragma pracetak yang dipasangkan antar gelagar jembatan dengan menggunakan kabel prategang.

DAFTAR PUSTAKA

Cook, R. D. 1995. *Finite Element Modeling for Stress Analysis*, John Wiley & Sons Inc.

Demetrios, E, T, P, E., & Jim, J, Z, P, E. 2007. *Bridge Engineering*, USA.

Hariandja, B. 2009. *Matematika Rekayasa II*, Bandung.

Hariandja, B. 2010. *Mekanika Rekayasa II: Analisis Struktur Dengan Metoda Gaya dan Metoda Perpindahan*, Bandung.

Hariandja, B. 2012. *Metoda Elemen Hingga Dalam Analisis Struktur*, Jakarta.

Katili, I. 2003. *Metode Elemen Hingga Untuk Pelat Lentur*, Jakarta.

Lin, T. Y., Burns, H. 1993. Terjemahan Hariandja, B., *Desain Struktur Beton Prategang*, Jakarta.

Logan, D.L. 2007. *A First Course in the Finite Element Method*, 4th Edition, Thomson, Canada.

Standar Nasional Indonesia, *Standar Pembebanan Untuk Jembatan*, RSNI T-02-2005

Wang, C. K., Salmon, C. G. 1992. terjemahan Hariandja, B., *Disain Beton Bertulang*, Jakarta.